МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 517.9 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

Математическое моделирование процессов теплообмена для воздушных надувных коллекторов цилиндрической формы*

О. А. Смирнова[1], Ю. Э. Аветисян[2]**
[1,2] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал), Донской государственный технический университет», г. Шахты, Ростовская область, Российская Федерация

Mathematical modeling of heat exchange processes for air-inflatable cylindrical collectors***

O. A. Smirnova[1], Y. E. Avetisyan[2]**
[1,2] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

Введение. Рассматривается новый вид устройств для сбора и аккумулирования энергии — воздушный надувной коллектор. Как правило, надувные коллекторы устанавливаются стационарно, что не подразумевает ориентацию коллектора вслед за движением Солнца. Ввиду низкой себестоимости рассматриваемых изделий, необходимо предложить и исследовать максимально эффективную конструкцию.
Материалы и методы. Рассматривается коллектор, состоящий из последовательно соединенных замкнутых цилиндрических сегментов. Полости цилиндров заполнятся воздухом, что обеспечивает постоянство конструкции. Математическое моделирование определения температурного поля воздушного надувного коллектора выполнено с помощью метода конечных элементов.
Результаты исследования. Распределение температурного поля, в зависимости от направления потока солнечной радиации, были подтверждены экспериментально. Математические модели признаны адекватными. Прирост температуры теплопоглощающего слоя по отношению к температуре окружающей среды составил от 7° до 26,2° в зависимости от части сегмента коллектора.
Обсуждение и заключения. В ходе имитационных и экспериментальных исследований было установлено, что на эффективность коллектора, кроме инсоляции Солнца, оказывают воздействие комплекс факторов окружающей среды: влажность воздуха, сила ветра и др. При этом необходимо учитывать конструктивное исполнение устройства, а также эксплуатационные и теплофизические характеристики применяемых материалов. Детальное исследование степени воздействия внешних и внутренних факторов на температурное поле коллектора требует последующей разработки программного комплекса.

Introduction. A new type of devices for collecting and accumulating energy – an air-inflatable collector – is considered. As a rule, inflatable collectors are installed permanently which does not imply the orientation of the collector following the solar motion. Due to the low costs of the products in question, it is necessary to offer and investigate the most efficient design.
Materials and Methods. A collector consisting of series-connected closed cylindrical segments is considered. Cavities of the cylinders are filled with air which maintains the structure constancy. Mathematical modeling of the definition of the air-inflatable collector temperature field is performed using the finite element method.
Research Results. The temperature field distribution as a function of the direction of solar radiation flow is substantiated experimentally. Mathematical models are considered adequate. The increase in temperature of the heat-absorbing layer with respect to the ambient temperature is from 7 ° to 26.2 ° depending on the part of the collector segment.
Discussion and Conclusions. In the course of simulation and experimental studies, it is established that the collector efficiency, apart from solar insolation, is affected by a range of environmental factors: air humidity, wind force, etc. In this case, it is necessary to take into account the device design, as well as the operational and thermophysical characteristics of the materials used. A detailed study of the severity of exposure of external and internal factors on the collector temperature field requires the subsequent development of the software package.

---

* Работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) договор №10577ГУ/2015 от 13.10.2016.
** E-mail: smir_nova@inbox.ru, 8754456@gmail.com
*** The research is supported by Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (FASIE) agreement No. 10577GU/2015 of 10.13.2016.

Ключевые слова: коллектор, тепловой поток, полимерные материалы, надувной, теплофизические свойства, математическая модель, метод конечных элементов, теплообмен.

***Образец для цитирования**:* Смирнова, О. А. Математическое моделирование процессов теплообмена для воздушных надувных коллекторов цилиндрической формы / О. А. Смирнова, Ю. Э. Аветисян // Вестник Дон. гос техн. ун-та. — 2018. — Т.2 № 2. — С.230–237. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

Keywords: collector, heat flow, polymeric materials, inflatable, thermal properties, mathematical model, finite element method, heat exchange.

For citation: O. A. Smirnova, Y. E. Avetisyan. Mathematical modeling of heat exchange processes for air-inflatable cylindrical collectors. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 230–237. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

Введение. Популяризация применения альтернативных источников энергии требует детального изучения новых гелиотехнических решений. Тем более, если речь идет о малоизученном сегменте надувных воздушных коллекторов (далее коллектор). Сложность и многофакторность процессов теплообмена в рассматриваемых системах определяют трудоёмкость сбора и анализа экспериментальных данных [1–8]. На этапе разработки новых устройств, а также оптимизации действующей модели коллектора, важна аналитика по каждому фактору, влияющему на эффективность устройства в целом. Разработанная математическая модель позволит изучить температурное поле коллектора в зависимости от направления потока солнечной радиации.

Постановка задачи. В качестве объекта исследования был выбран коллектор, представляющий собой систему последовательно соединенных замкнутых цилиндров, наполненных воздухом. Каждый цилиндр системы состоит из двух слоев: верхнего — светопропускающего и нижнего — теплопоглощающего (абсорбера). Касательно к выступающим точкам теплопоглощающей части цилиндра прикреплена теплоизоляционная подложка. В образовавшемся зазоре локализуется теплоноситель — воздух. Предлагаемая конструкция коллектора (рис. 1) позволяет обеспечить стабильно высокую температуру теплоносителя вне зависимости от направления потока солнечной радиации на поверхность коллектора.

Результаты натурных и лабораторных экспериментов [9] определили основные требования, предъявляемые к материалам коллектора. Для изготовления светопропускающего слоя коллектора был выбран полиэтилентерефталат. Данный материал обладает высокими показателями теплостойкости, стойкости к УФ-старению, а также коэффициентом светопропускаемости равным 0,85. Теплопоглощающий слой выполнен из шерстяного полотна, оно вкладывается по контуру нижнего полуцилиндра.

Рассмотрим процесс теплообмена в одном звене солнечного коллектора (рис. 2) в зависимости от направления потока радиации на поверхность коллектора. Ввиду наличия прозрачного верхнего слоя предложено допущение, что верхний слой не оказывает значительного воздействия на распределение температурного поля цилиндрического сегмента.

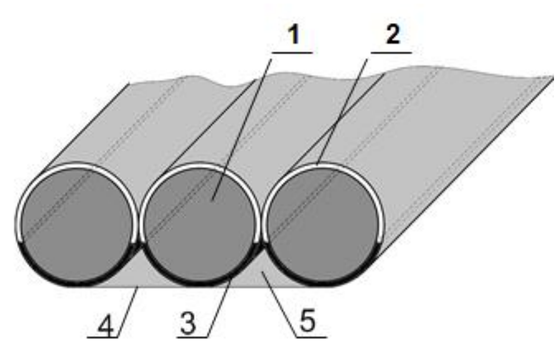


Рис. 1. Изображение воздушного надувного коллектора в разрезе:
1 — цилиндрический сегмент коллектора; 2 — светопропускающий прозрачный слой сегмента;
3 — теплопоглощающий слой сегмента;
4 — теплоизоляционный слой, 5 — область локализации теплоносителя

Fig. 1. Profile of air-inflatable collector:
1 - cylindrical collector segment; 2 - translucent transparent segment layer;
3 - heat-absorbing segment layer; 4 - heat-insulating layer,
5 - heat carrier localization area

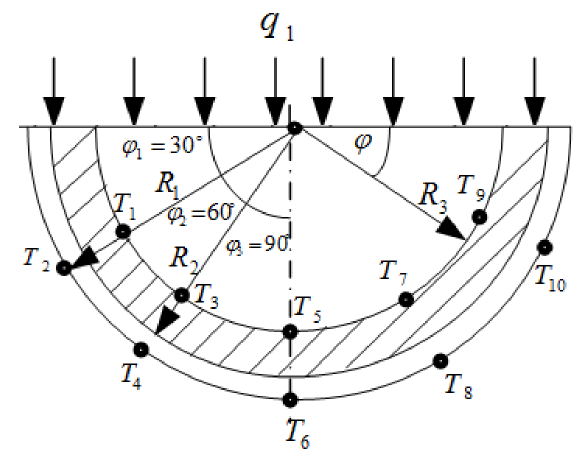


Рис. 2. Область расчета цилиндрического сегмента коллектора, в случае, если источник света расположен под прямым углом к диаметру сегмента коллектора

Fig. 2. Calculation domain of cylindrical collector segment in case when light source is normal to diameter of collector segment

Математическая модель задачи имеет вид:

область D_1 $$div\left(\lambda_1 gradT^{(1)}\right)=0\,; \quad (1)$$

область D_2 $$div\left(\lambda_2 gradT^{(2)}\right)=0\,. \quad (2)$$

Примем следующие граничные условия

$\rho = R_1$,

$$\lambda_2 \frac{\partial T^{(2)}}{\partial \rho} = -\alpha_1\left[T^{(2)}\left(R_1,\phi\right)-T_{окр}\right];$$

$$\rho = R_2\,,$$

$$T^{(1)}\left(R_2,\phi,t\right)=T^{(2)}\left(R_2,\phi,t\right);\ \lambda_1\frac{\partial T^{(1)}}{\partial\rho}=\lambda_2\frac{\partial T^{(2)}}{\partial\rho}\,;$$

$$\rho = R_3\,.$$

Для расчета температурного поля будем использовать метод конечных элементов (МКЭ). На рис. 3 представлена конечно-элементная сетка, покрывающая область расчета.

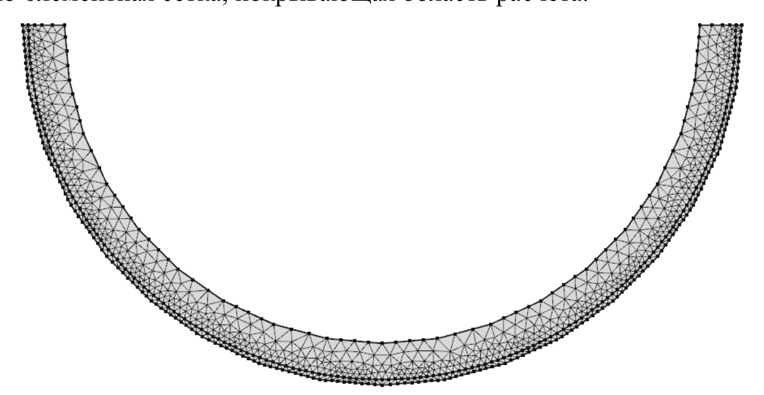


Рис. 3. Конечно-элементная сетка области расчета

Fig. 3. Finite-element grid of calculation domain

Решение данной задачи сводится к итерационному численному решению прямых задач и минимизации функционала

$$J=\sum_{j=1}^{N}\left(T_j - T_j^{изм}\right), \quad (3)$$

где N — число точек измерения температуры $T_j^{изм}$, T_j — значения температуры в тех же точках, полученных

путем решения прямых задач методом конечных элементов.

МКЭ в настоящее время стал одним из самых распространенных и эффективных методов решения задач математической физики и техники, сформулированных в виде краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными.

Пусть требуется найти распределение температуры $T(N)$ в некоторой области V, удовлетворяющей уравнению стационарной теплопроводности

$$div\left(\lambda^{(N)} gradT(N)\right) + f(N) = 0 \quad (4)$$

и условию на поверхности S, ограничивающей область V,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(M) = -\alpha(M) T(M), \quad (5)$$

где $\lambda(N)$ — коэффициент теплопроводности, в общем случае функция точки $N \in V$; $\alpha(M)$ — коэффициент теплоотдачи, $M \in S$; $f(N)$ — объемная плотность источников тепла.

Первый этап МКЭ — построение неортогональной сетки, покрывающей область расчета V. Сетка образует совокупность конечных элементов, например, тетраэдров, в плоскопараллельном поле треугольников. Далее следует нумерация элементов и узлов, составление массивов координат узлов.

На втором этапе выполняется аппроксимация искомых и известных функций (в нашем случае $T(N)$ и $f(N)$). На третьем этапе будет показано, что математическую модель исходной задачи можно преобразовать так, что аппроксимацию функций $T(N)$ и $f(N)$ допустимо искать в пространстве дифференцируемых функций C. Построим в этом пространстве подпространство с конечным базисом $\{\psi_j\}_{j=1}^{n}$. Базисные функции $\psi_j(N)$ выберем финитными (с конечным носителем) и кусочно-линейными.

В j-м узле сетки положим $\psi_j = 1$, в остальных узлах $\psi_j = 0$.

Тогда аппроксимирующие функции на втором этапе МКЭ будут иметь вид

$$\tilde{T}(x,y,z) = \sum_{j=1}^{n} T_j \psi_j(x,y,z); \; \tilde{f}(x,y,z) = \sum_{j=1}^{n} f_j \psi_j(x,y,z),$$

где n — количество узлов сетки; $T_j = T(x_j, y_j, z_j)$; $f_j = f(x_j, y_j, z_j)$.

В пределах k-го конечного элемента искомая функция представляется в виде

$$\tilde{T}^k(x,y,z) = \sum_{j=m+1}^{m+4} T_j \psi_j^k(x,y,z), \quad (6)$$

где $\psi_j^k = a_j^k x + b_j^k y + c_j^k z + d_j^k$.

В случае плоскопараллельного поля имеем

$$\tilde{T}^k(x,y) = \sum_{j=m+1}^{m+3} T_j \psi_j^k(x,y),$$

где $\psi_j^k = a_j^k x + b_j^k y + c_j^k$.

Постоянные коэффициенты ψ_j^k определяются через координаты узлов элемента.

На третьем этапе интегралы по области V заменяются суммой интегралов по конечным элементам V^k, интегралы по S — суммой интегралов по граням элементов, аппроксимирующих S.

Строится система уравнений МКЭ и учитываются граничные условия. Эту систему называют дискретной математической моделью задачи (ДММ).

Рассмотрим построение ДММ для проекционного варианта МКЭ, суть которого заключается в минимизации нормы невязки

$$\varepsilon = div\lambda grad\tilde{T}(N) + f$$

путем ортогонального проектирования ее на конечномерное подпространство с базисом $\{\psi_j\}_{j=1}^{n}$. Минимум невязки обеспечен в том случае, если все скалярные произведения невязки ε и ψ_j будут равны нулю.

В МКЭ принято использовать скалярные произведения более широкого класса функций (L_2).

В результате получим систему МКЭ в виде

$$\iiint_V \psi_i \left[div\left(\lambda grad\tilde{T}\right) + f \right] dV = 0,\ i = 1,2,...,n.$$

Используя известные тождества

$$div\left(\phi\vec{a}\right) = \phi div\vec{a} + \vec{a} grad\phi;$$

$$\iiint_V div\left(\phi\vec{a}\right) dV = \iint_S \phi a_n dS,$$

где φ — скалярная функция; $\vec{a}$ — векторная функция; a_n — проекция $\vec{a}$ на внешнюю по отношению к V нормаль, получим систему уравнений вида

$$\iiint_V \lambda grad\tilde{T} grad\psi_i dV = \iint_S \lambda\psi_i \frac{\partial T}{\partial n} dS + \iiint_V \psi_i f dV,\ i = 1,2,...,n, \quad (7)$$

где n — число узлов сетки, в которых неизвестны T_j.

Дальнейшие преобразования (7) приводят к системе уравнений вида

$$\sum_k \lambda^k \sum_j \beta_{ij}^k T_j = \sum_k \lambda^k q^k \iint_{S^k} \psi_i^k dS + \sum_k \sum_j f_j \iiint_{V^k} \psi_i^k \psi_j^k dV,\ i = 1,2,...,n, \quad (8)$$

где $q^k = \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{S^k}$ — нормальная производная $T\left(M\right)$ на грани $S^k \in S$ k-го конечного элемента (принимается постоянной); V^k — область k-го элемента; $\beta_{ij}^k = \iint_{V^k} grad\psi_i^k grad\psi_j^k dV$.

Внешнее суммирование в (8) (по k) ведется по всем элементам, имеющим общий узел i, внутреннее (по j) — по всем узлам k-го элемента. Для всех внутренних узлов первый интеграл в правой части (8) равен нулю.

Систему (8) называют дискретной математической моделью задачи, если в нее подставить граничные условия. Решение системы (8) и использование (6) позволяют определить все интересующие величины (градиенты, потоки и т.п.).

Исходные данные: температура окружающего воздуха $T_{окр} = 23$ °С; тепловой поток $q = q_1 \sin\phi$, $q_1 = 310$ Вт/м² (значение теплового потока от источника излучения). Теплопроводность: светопропускающего слоя $\lambda_1 = 0,03$ Вт/м·К; теплопоглощающего слоя $\lambda_2 = 0,34$ Вт/м·К; коэффициент теплоотдачи $\alpha_T = 9,5$ Вт/м²·К; $R_1 = 0,05$ м; $R_2 = 0,0492$ м; $R_3 = 0,0442$ м; $\phi_1 = 30^\circ$; $\phi_2 = 60^\circ$; $\phi_3 = 90^\circ$.

Необходимо определить распределение температур в установившемся режиме в точках: $T_1\left(R_3,\phi_1\right)$; $T_2\left(R_1,\phi_1\right)$; $T_3\left(R_3,\phi_2\right)$; $T_4\left(R_1,\phi_2\right)$; $T_5\left(R_3,\phi_3\right)$; $T_6\left(R_1,\phi_3\right)$.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице1.

Таблица 1
Table 1

	$T_1\left(R_3,\phi_1\right)$	$T_2\left(R_1,\phi_1\right)$	$T_3\left(R_3,\phi_2\right)$	$T_4\left(R_1,\phi_2\right)$	$T_5\left(R_3,\phi_3\right)$	$T_6\left(R_1,\phi_3\right)$
Вычисленные значения, °С	48,7	41,3	56,7	46,8	60,1	49,2

Далее приведены результаты математического моделирования теплообмена в одном сегменте коллектора для случая, когда источник света расположен под углом 45° к диаметру образца (рис. 4).

Исходные данные соответствуют тем, которые использовались при моделировании первого случая. Найдем распределение температур в установившемся режиме в точках: $T_1\left(R_3,\phi_1\right)$; $T_2\left(R_1,\phi_1\right)$; $T_3\left(R_3,\phi_2\right)$; $T_4\left(R_1,\phi_2\right)$; $T_5\left(R_3,\phi_3\right)$; $T_6\left(R_1,\phi_3\right)$; $T_7\left(R_3,\phi_4\right)$; $T_8\left(R_1,\phi_4\right)$; $T_9\left(R_3,\phi_5\right)$; $T_{10}\left(R_1,\phi_5\right)$.

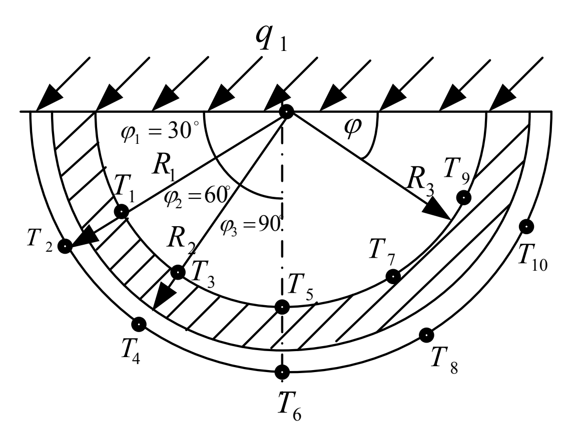


Рис. 4. Область расчета для случая, когда поток солнечного излучения расположен под углом к диаметру сегмента коллектора

Fig. 4. Calculation domain for case when solar radiation flux is set at 45° angle to collector segment diameter

Значения плотности теплового потока, приведенные в таблице 2, найдены на основе решения обратной задачи теплообмена.

Таблица 2

Table 2

γ, °	0–10	10–20	20–30	30–60	60–70	70–80	80–90	90–100	100–110	110–120	120–130	130–180
q, Вт/м^2	182	194	202	210	202	194	182	126	122	117	111	105

Адекватность математической модели была проверена экспериментально. С этой целью был изготовлен замкнутый цилиндрический сегмент коллектора. В качестве абсорбера использовалось шерстяное полотно. В ходе эксперимента образец воздушного коллектора был установлен вертикально. Напротив образца на расстоянии 0,8 м располагался источник света — прожектор с галогеновой лампой мощностью 1кВт. Излучение на поверхность теплопоглощающего слоя было направлено под углом 45°. С помощью датчиков температуры ИВТ (прибора для измерения плотности теплового потока) были зафиксированы значения температуры наружной поверхности светопропускающего и теплопоглощающего слоев в период термостабилизации, т.е. по истечении 20 мин. воздействия на коллектор источника света.

Результаты измерительного и вычислительного экспериментов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

	$T_1(R_3,\phi_1)$	$T_2(R_1,\phi_1)$	$T_3(R_3,\phi_2)$	$T_4(R_1,\phi_2)$	$T_5(R_3,\phi_3)$
Измеренные значения, °С	47,0	39,0	48,0	36,0	35,6
Вычисленные значения, °С	46,1	38,2	44,0	36,7	38,8
Погрешность, %	1,9	2,1	8,3	–1,9	–8,2
	$T_6(R_1,\phi_3)$	$T_7(R_3,\phi_4)$	$T_8(R_1,\phi_4)$	$T_9(R_3,\phi_5)$	$T_{10}(R_1,\phi_5)$
Измеренные значения, °С	30,6	33,0	30,0	33,4	32,3
Вычисленные значения, °С	33,1	34,5	30,0	34,4	30,0
Погрешность, %	–8,2	–4,5	0,0	–3,0	7,1

Среднеквадратическая погрешность $\Delta(T) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{10}\left(T_i - T_i^*\right)^2}{10}} = 2,08$ °С.

Следовательно, результаты моделирования процессов теплообмена в сегменте коллектора для разных направлений воздействия потока солнечного излучения согласуются с результатами измерений с достаточной для инженерных задач точностью.

Выводы. Прирост температуры теплопоглощающего слоя по отношению к температуре окружающей среды составил от 7° до 26,2° в зависимости от рассматриваемой части сегмента коллектора и направления воздействия потока солнечной радиации. Таким образом, локализуясь между теплопоглощающим слоем и теплоизоляционной подложкой, конструкция коллектора обеспечит нагрев теплоносителя. Максимальные значения температурного поля поверхности теплопоглощающего слоя (60°) коллектора отмечаются при прямом воздействии солнечного излучения. Изменение угла воздействия потока излучения до 45° приводит к снижению температуры. В зависимости от сектора воздействия, температура поверхности теплопоглощающего слоя может снижаться на 3–14° по отношению к замерам при прямом воздействии солнечных лучей.

Адекватность разработанной математической модели позволит разработать программный продукт, который автоматизирует процесс расчета температурного поля коллектора.

Библиографический список

1. ГОСТ 28205–89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Руководство по испытанию на воздействие солнечной радиации / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов, 1989г. — 17с.

2. ГОСТ Р 51910–2002. Методика исследования и проверки ускоренными методами влияния внешних воздействующих факторов на долговечность и сохраняемость технических изделий / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2002г. — 20с.

3. ГОСТ Р 26883–86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения / Государственный комитет СССР по стандартам — Москва : Издательство стандартов, 1986г. — 9с.

4. ГОСТ 28202–89 (СТ МЭК 68–2–5–75). Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Имитированная солнечная радиация на уровне земной поверхности: / Государственный комитет СССР по стандартам — Москва : Издательство стандартов, 1989. — 5.

5. ГОСТ Р 55617.1–2013. Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 1. Общие требования / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2013г. — 5с.

6. ГОСТ Р 51595–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2001г. — 27с.

7. ГОСТ Р 55617.2–2013. Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 2. Методы испытаний / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2014г. — 94с.

8. Смирнова, О. А. Концепция комплексной оценки эксплуатационных показателей надувного коллектора / О. А. Смирнова, М. А. Гончарова, Ю. Э. Аветисян // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития. — 2017. — №2. — С.63–67.

9. Смирнова, О. А. Конфекционирование полимерных материалов для надувных воздушных солнечных коллекторов / О. А. Смирнова И. В. Ващинская, М. А. Гончарова, Ю. Э. Аветисян // Инновации в науке. — 2016. — №4 — С.52–57.

10. Бахвалов, Ю. А. Обратные задачи электротехники: монография / Ю. А. Бахвалов, Н. И. Горбатенко, В. В. Гречихин — Новочеркасск: Изд-во журнала «Изв. ВУЗов. Электромеханика», 2014. — 211 с.

11. Никифоров, А. Н. Методы оптимизации: учеб. пособие / А. Н. Никифоров — Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2007. — 160 с.

References

1. GOST 28205–89. Osnovnye metody ispytaniy na vozdeystvie vneshnikh faktorov. Chast' 2. Ispytaniya. Rukovodstvo po ispytaniyu na vozdeystvie solnechnoy radiatsii. [State standard 28205–89. Basic environmental testing procedures. Part 2. Guidance for solar radiation testing.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 17p. (in Russian).

2. GOST R 51910–2002. Metodika issledovaniya i proverki uskorennymi metodami vliyaniya vneshnikh vozdeystvuyushchikh faktorov na dolgovechnost' i sokhranyaemost' tekhnicheskikh izdeliy. [GOST R 51910–2002. Research and testing strategy by accelerated methods of environmental conditions influence for industrial products longevity and storage ability. Development and design.] RF State Standards Committee, 2002, 20 p. (in Russian).

3. GOST R 26883–86. Vneshnie vozdeystvuyushchie faktory. Terminy i opredeleniya. [GOST R 26883–86. Exposure factors. Terms and definitions.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986, 9 p. (in Russian).

4. GOST 28202–89 (ST MEK 68–2–5–75). Osnovnye metody ispytaniy na vozdeystvie vneshnikh faktorov. Chast' 2. Ispytaniya. Imitirovannaya solnechnaya radiatsiya na urovne zemnoy poverkhnos. [GOST 28202–89 (ST IEC 68–2–5–75). Basic environmental testing. Part 2. Tests. Test Sa: Simulated solar radiation at ground level.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 5 p. (in Russian).

5. GOST R 55617.1–2013. Vozobnovlyaemaya energetika. Ustanovki solnechnye termicheskie i ikh komponenty. Solnechnye kollektory. Chast' 1. Obshchie trebovaniya. [GOST R 55617.1–2013. Renewable power engineering. Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 1. General requirements.] RF State Standards Committee, 2013, 5 p. (in Russian).

6. GOST R 51595–2000. Netraditsionnaya energetika. Solnechnaya energetika. Kollektory solnechnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [GOST R 51595–2000. Nontraditional power engeneering. Solar power engeneering. Solar collectors. General specifications.] RF State Standards Committee, 2001, 27 p. (in Russian).

7. GOST R 55617.2–2013. Vozobnovlyaemaya energetika. Ustanovki solnechnye termicheskie i ikh komponenty. Solnechnye kollektory. Chast' 2. Metody ispytaniy. [GOST R 55617.2–2013. Renewable power engineering. Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 2. Test methods.] RF State Standards Committee, 2014, 94 p. (in Russian).

8. Smirnova, O.A., Goncharova, M.A., Avetisyan, Y.E. Kontseptsiya kompleksnoy otsenki ekspluatatsionnykh pokazateley naduvnogo kollektora. [Concept of full assessment of service factors of air-inflatable collector.] Innovatsionnye issledovaniya: problemy vnedreniya rezul'tatov i napravleniya razvitiya. [Innovative research: problems of results implementation and development trends.] 2017, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).

9. Smirnova, O.A., Vashchinskaya, I.V., Goncharova, M.A., Avetisyan, Y.E. Konfektsionirovanie polimernykh materialov dlya naduvnykh vozdushnykh solnechnykh kollektorov. [Corfection of polymeric materials for air-inflatable solar collectors.] Innovatsii v nauke, 2016, no. 4, pp. 52–57 (in Russian).

10. Bakhvalov, Y.A., Gorbatenko, N.I., Grtchikhin, V.V. Obratnye zadachi elektrotekhniki: monografiya. [Inverse problems of electrical engineering: monograph.] Novocherkassk: Publ. House “University Proceedings”, 2014, 211 p. (in Russian).

11. Nikiforov, A.N. Metody optimizatsii: ucheb. posobie. [Optimization methods.] Novocherkassk: SPSPU {NPI), 2007, 160 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 06.12.2017
Сдана в редакцию 06.12.2017
Запланирована в номер 17.03.2018

Received 06.12.2017
Submitted 06.12.2017
Scheduled in the issue 17.03.2018

Об авторах:

Смирнова Ольга Александровна,
начальник отдела подготовки кадров высшей квалификации и организации научных исследований Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета в г. Шахты (РФ,346500, г. Шахты, ул. Шевченко,147), кандидат технических наук, доцент
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1992-6386
smir_nova@inbox.ru

Аветисян Юрий Эрнестович,
студент кафедры «Строительство и техносферная безопасность» Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета ДГТУ в г. Шахты (РФ,346500, г. Шахты, ул. Шевченко,147),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3278-2230
8754456@gmail.com

Authors:

Smirnova, Olga A.,
head of the Department for Training Highly Qualified Staff and Organization of Scientific Research, Institute of Service and Business (DSTU branch) (Russia, 346500, Shakhty, ul. Shevchenko, 147), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1992-6386
smir_nova@inbox.ru

Avetisyan, Yury E.,
student Institute of Service and Business (DSTU branch) (Russia, 346500, Shakhty, ul. Shevchenko, 147),
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3278-2230
8754456@gmail.com